

Василија Шарац
Гоце Стефанов, Добри Чундев
Електротехнички факултет
Универзитет Гоце Делчев

РАЗЛИЧНИ АСПЕКТИ НА КОРИСТЕЊЕ НА SF₆ ГАСОТ ВО ВИСОКОНАПОНСКАТА РАСКЛОПНА ОПРЕМА И МЕРКИ ЗА ПРЕВЕНЦИЈА НА ЕМИСИЈАТА

КУСА СОДРЖИНА

SF₆ гасот има широка примена во високонапонската расклопна и гасно изолирана опрема како резултат на одличните диелектрични карактеристики и многу добрата способност за гаснење на електричниот лак. Негативна страна во неговата употреба е тоа што SF₆ гасот припаѓа на групата гасови кои го поттикнуваат ефектот на стаклена градина и допринесуваат кон глобалното загревање. Во текот на изминативе години направени се голем број истражувања со цел да се најде негова соодветна замена. Ниеден од испитаните гасови како азот (N₂), јаглерод диоксид (CO₂) или смеса од SF₆ и N₂, не дадоа соодветно решение. Бидејќи во догледно време не се предвидува дека ќе се изнајде соодветна замена за SF₆ гасот потребно е да се превземат адекватни мерки со цел да се намали неговата емисија. Мерките треба да бидат превземени за време на производството, работата, одржувањето на високонапонската опрема како и при ракувањето со SF₆ гасот за да остане во еден затворен круг. Во трудот се представени неколку производители и нивниот технолошки развој во однос на намалувањето на истекувањето на гасот како и можностите и опремата која се користи за навремена детекција на истекувањето на гасот. Претставен е и концептот на рециклирање на гасот кој е многу застапен во земјите во западна Европа. На тој начин е направена една сеопфатна анализа во однос на мерките кои се превземаат за заштита на животната средина во однос на емисија на SF₆ гасот почнувајќи од производството на високонапонската опрема, преку детекција на неговото истекување во тек на работата на опремата до концептот на повторно користење на гасот (рециклирање).

Клучни зборови: SF₆ гас, високонапонски расклопна опрема, истекување на гас

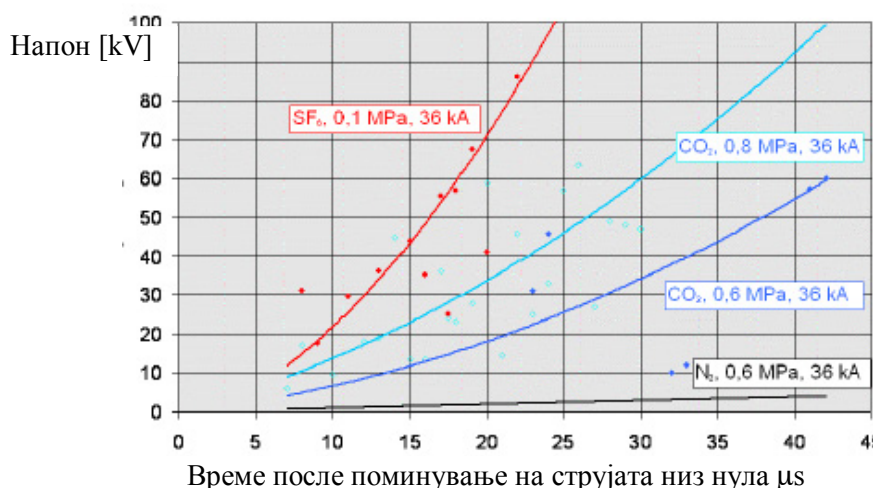
1 ВОВЕД

Гасот сулфур хексахлорид (SF₆) има голем број на карактеристики кои го прават атрактивен за користење во високонапонската расклопна опрема. Се одликува со одлични диелектрични својства, способност за гасење на електричниот лак, хемиски е инертен, не е токсичен и не е запалив. Од друга страна SF₆ гасот има глобален потенцијал за загревање дваесет и два пати поголем од јаглерод диоксидот (CO₂) и тој е еден од гасовите кој според Којото повелбата се означени како гасови кои го поттикнуваат ефектот на стаклена градина. За жал, се уште не постои алтернативна технологија кој ќе овозможи користење на други гасови како медиум за гасење на електричниот лак во високонапонската расклопна опрема. Многу истражувања беа спроведени во тек на изминативе години но сите покажаа дека употребата на алтернативни гасови е многу ограничена во споредба со SF₆ и е утврдено намалување на прекинувачката способност во однос на електричниот лак кај користените гасови. Уште повеќе што користењето на алтернативни гасови или вакуум во високонапонската опрема доведува до поголеми димензии на истата, повисоки трошоци за производство, зголемени загуби при

работата на опремата што во целина води кон зголемено влијание врз животната средина. Затоа е неопходно да се превземат мерки за време на производството, работата, одржувањето на опремата како и при ракувањето со гасот со цел да остане во еден затворен круг што во целина допринесува до намалување на глобалната емисија, иако треба да напоменеме дека SF_6 гасот учествува само со 0,1 процент во глобалното затоплување а SF_6 гасот кој се користи во електричната опрема учествува само со 10 % во горе споменатата бројка. Некои од тие мерки се преставени во трудот, врз основа на развојот кај различни производители на електрична опрема и испорачатели на SF_6 гас.

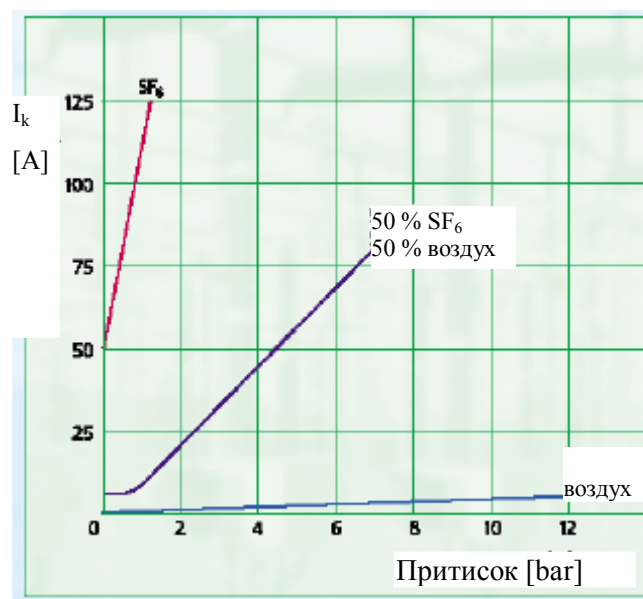
2 МОЖНОСТ ЗА КОРИСТЕЊЕ НА АЛТЕРНАТИВНИ ГАСОВИ ВО ВИСОКОНАПОНСКАТА ОПРЕМА

Способностите на SF_6 гасот како медиум за гаснење на електричниот лак се споредени со способноста на N_2 и CO_2 преку истражување поврзани со воспоставувањето на диелектричните својства во средината каде што се гаси лакот, односно воспоставување на соодветниот напон [1]. На Слика 1 е претставено воспоставувањето на диелектрични својства во воздушниот зјај помеѓу контактите на високонапонскиот прекинувач 123 kV/40 kA при делување на струја на куса врска од 36 kA, со време на горење на лакот од 17 ms за испитаните гасови како можни медиуми за гаснење на електричниот лак. Гасот азот N_2 има најбавно време на опоравување, при што се добиени напони од 15 до 20 kV приближно 100 μs од поминување на струјата низ нула додека CO_2 има нешто побрзо време на опоравување. Со зголемување на притисокот од 0,6 на 0,8 MPa е добиено дополнително зголемување на времето на опоравување и воспоставување на напонот. Но вредностите кои се добиени кај гасовите CO_2 и N_2 се распорскани и некохерентни во однос на вредностите добиени при користење на SF_6 гасот.



Слика 1 Влијание на гасовите врз воспоставување на диелектрични својства во високонапонски прекинувач

Тоа значи дека прекинувач наменет за работа со SF_6 за 145 kV/40 kA ќе може да прекине струја на куса врска од 25 kA во 38 kV мрежа при користење на гасот CO_2 со зголемен притисок како медиум за гаснење на лакот. На Слика 2 е прикажана друга анализа која ги потврдува предностите на SF_6 гасот како медиум за гаснење на лакот споредено со смеса од SF_6 гас и воздух. Предноста на SF_6 гасот е во однос на прекинувачката моќ која ја има во однос на големината на струјата на куса врска. Од погоре наведените факти се изведува заклучок дека до сега не постои практично применлива алтернатива за користење на други гасови како медиум за гаснење на електричниот лак во високонапонската расклопна опрема. Исклучителната стабилност на SF_6 гасот заедно со големата диелектрична јачина и одличните својства за гаснење на електричниот лак го прават идеален гас за користење во високонапонските гасно изолирани трафостаници (GIS) и високонапонската расклопна опрема која се користи при пренос и дистрибуција на електричната енергија.



Слика 2 Способноста за гаснење на електричен лак кај SF₆, воздух и смеса од двата гас

Сите трафостаници и сите производители на опрема користат високонапонски прекинувачи со SF₆ гас и секоја GIS трафостаница како основен изолационен медиум го користи SF₆ гасот. Неговата стабилност која го прави одличен диелектрик исто така допринесува тој да биде означен како еден од гасовите кои го создаваат ефектот на стаклена градина и е 22,5 пати поефикасен во задржувањето на инфрацрвеното зрачење во однос на еквивалентна количина од CO₂ гас со време на живот од 520 години. Затоа се превземаат мерки како од страна на производителите така и од страна на корисниците со цел да се намали емисијата на SF₆ гасот во сите аспекти на неговото користење: развој на опремата, производство, инсталација, пуштање во работа, емисија во тек на работата на опремата, поправка и одржување како и крај на животниот век на гасот и негово рециклирање.

3. УПРАВУВАЊЕ СО КОРИСТЕЊЕТО НА ГАСОТ

Со цел да се намали емисијата на SF₆ гас одредени мерки се превземаат при производство на електричната опрема како што се :

- Намалување на потребната количина на SF₆ гас без да се ризикува во однос на функционалноста на опремата.
- Производство на опремата со зголемена непропустливост во однос на истекување на гасот.

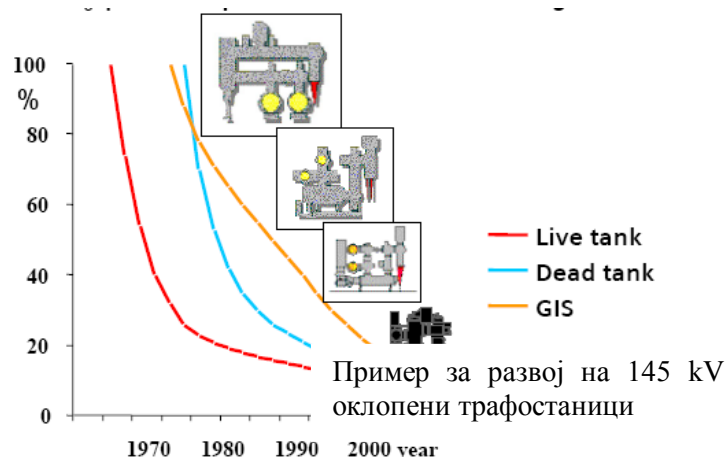
Вака превземените мерки резултираа со многу мал процент на истекување на гасот особено во среднонапонските дистрибутивни ќелии од 0,1 % на годишно ниво. За високонапонската опрема овој процент изнесува помалку до 0,5%. Под управување со користењето на гасот спаѓа и:

- Детекција на истекувањето на гасот со современи инструменти
- Анализа на гасот
- Рециклирање на гасот
- Пакување, означување и транспорт на рециклираниот гас
- Обука и едукација на персоналот

3.1 Намалување на количеството на SF₆ гас во електричната опрема

На Слика 3 е претставен еден пример на развој на високонапонска оклопена трафостаница почнувајќи од седумдесетите години па до денес од производителот Siemens A.G.

Количеството на SF_6 гас е намалено за 20 % од својата почетна вредност. Една причина за ваквото намалување е оптимизацијата на искористувањето диелектричните особини на гасот која допринесе кон помали димензии на опремата. Друга причина е зголемувањето на прекинувачката моќност по прекинувачко место што резултира со помал број на прекинувачки места. Во почетоките на развојот на SF_6 технологијата биле потребни четири прекинувачки места за да се прекине струја до 40 кА на 245 кV напонско ниво. Денеска е доволно само едно прекинувачко место за да се реализира истата задача.



Слика 3 Намалување на количините на SF_6 гас во високонапонските оклопени трафостаници на Сименс

3.2 Проектирање на опремата со зголемена непропустливост во однос на истекување на гасот

Многу производители посветуваат посебно внимание на производство на опремата со зголемена непропустливост во однос на истекување на гасот. Арева во текот на осумдесетите години користела систем за заптивање составен од два О прстени ставени еден блиску до друг заедно со систем за проверка на истекувањето на гасот поставен помеѓу двата прстени [2]. Од надворешната страна истите се подмачкуваат за да се заштитат од согорени делови (Слика 4). Денес се користи систем за заптивање во GIS технологија кој е составен од три заптивки во една заптивка со специјална форма. Главната заптивка е заштитена од внатрешна и надворешна страна од корозија со две помошни заптивки (Слика 4).



(а) заптивање со два О-прстени

(б) заптивање со три О-прстени

Слика 4 Системи за заптивање кај високонапонски GIS трафостаници-Арева

Заптивката е поставен во жлеб со цел да се избегне било каков ризик од оштетување. Други производители како Siemens користат опрема за тестирање со хелиум за детектирање на истекувањето на гасот (Слика 5) за време на рутинските тестови на целата високонапонска опрема која користи гас под притисок.

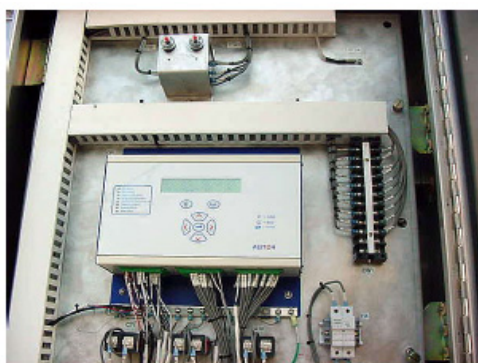


Слика 5 Опрема со хелиум за тестирање на истекување на гас во лабораториите на Сименс

Споредено со SF_6 гасот молекулите на хелиумот се помали и на тој начин брзо се детектираат местата на истекување или грешки во процесот на производство.

3.3 Детекција на истекување на гасот со современи инструменти

Различни производители во текот на изминатите години имаат развиено современи инструмент за детекција на истекувањето на SF_6 гасот. Ова е важно како од аспект на работата на опремата така и од аспект на заштита на животната средина. Арева го има развиено уредот CB-Watch 2 (Слика 6) кој постојано ја следи состојбата на високонапонскиот прекинувач, ги сигнализира сите проблеми во вистинско време и ги доставува потребните информации во однос на одржувањето. Уредот ја мери температурата и притисокот на гасот во прекинувачот и ја пресметува густината на гасот врз основа на алгоритмот на Beattie и Bringemann, алгоритам кој е најблизок до експерименталните резултати. Работниот опсег на уредот е од -50°C до $+60^\circ\text{C}$. Уредот ги спречува лажните аларми во случај на втечнување на гасот, и дава индикација кога ќе настапи втечнување на гасот.



Слика 6 Уредот CB Watch 2 инсталиран во командниот ормар на Арева прекинувач

Овој уред има опција за користење на стандарден MODBUS протокол за комуникација со останатите дигитални уреди. Истовремено врши мониторинг на смесата на гасови (на пример SF_6/N_2) во текот на времето и сигнализира доколку смесата не е во бараниот сооднос. Flirt Systems Inc имаат развиено инфрацрвена камера која може да детектира многу мали истекувања на гасот (Слика 7) [3]. Камерата е со мала тежина, пренослива, работи на батерии и е со висока чувствителност во однос на детектирање на мали истекувања. Инфрацрвената камера која користи технологија на скенирање е применета со ограничен успех. Во овој случај камерата емитува ласерски зрак кој е со иста бранова должина како и опсегот на апсорпција на SF_6 гасот, $10.6 \mu\text{m}$. Камерата е дизајнирана да го прими рефлектираниот зрак и да прикаже инфрацрвена слика. Кога ласерскиот зрак ќе го пресече облакот со SF_6 гас, тој двапати се пригушува, еднаш при емитирањето а еднаш при неговата рефлексија. Кај ваквите системи

настанува проблем во однос на рефлексијата, при што не секогаш и доверливо може да се детектира облак од SF₆ гас. Новоразвиената инфрацрвена камера користи специјален филтер кој може да пропушта во областа на инфрацрвеното зрачење и се совпаѓа со брановата должина од вибрации/ротации и пренесување на енергијата од валентните врски на молекулите. Овие пренесувања на енергијата се поврзани со полето преку промената на диполниот момент на молекулата и се чести кај голем број на гасови и пареи. На тој начин камерата е многу осетлива на различни видови гасови и пареи. Термички, осетливоста на камерата е 35 mK.



(а) Инфрацрвена камера-Flirt



(б) Детекција на истекување на гасот

Слика 7 Инфрацрвена камера за детекција на истекување на гасот –Flirt Systems

3.4 Анализа на гасот

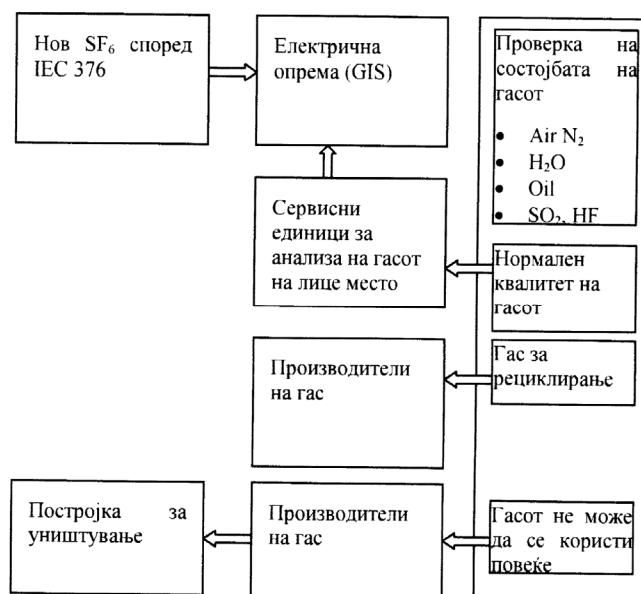
Познавањето на квалитетот на SF₆ гасот овозможува да се намалат проблемите при работата на опремата како и трошоците за нејзиното одржување. Во текот на гаснењето на електричниот лак SF₆ гасот апсорбира голема енергија од лакот и се дисоцира на SF₅ и F. Поголемиот дел од гасот после гаснењето на лакот ги повратува своите првобитни особини, но оваа рекомбинација на молекулите на гасот не е секогаш целосна. Ако за време на гаснењето на лакот има присуство на влага или на воздух, еден дел од гасот перманентно се дисоцира. При секое одстранување на гасот од високонапонската опрема следниве компоненти на гасот мора да бидат измерени: продуктите добиени со дисоцијација на гасот, концентрацијата на SF₆ гасот и точката на роса. За таа намена може да се користат различни инструменти и еден од тие е прикажан на Слика 8 од производителот DILO. Користењето на инструменти за анализа на гасот овозможува хронолошко следење на неговиот квалитет следствено се овозможува следење на карактеристиките на опремата и помага при планирањето на активностите за одржување на опремата.



Слика 8 Инструмент за анализа на гасот од производителот DILO

3.5 Концепт на рециклирање на гасот

Концептот на рециклирање на гасот е прикажан на Слика 9 со три три можни сценарија кои може да се сретнат во пракса: гас со нормален квалитет кој може да продолжи да се користи во опремата, гас за рециклирање кој може да се преработи на лице место каде што се користи опремата и гас кој не може да се користи повеќе и се враќа назад кај производителот.

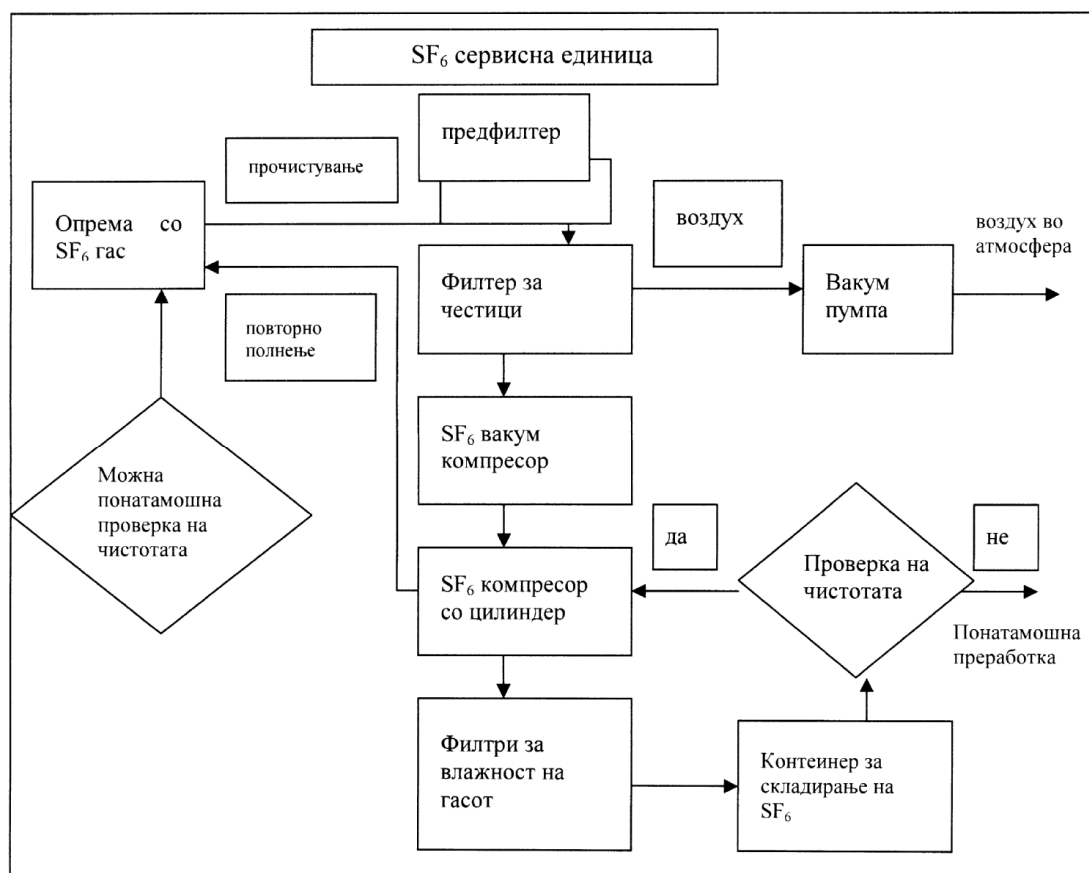


Слика 9 Блок дијаграм за концептот на повторно користење на гасот

Откако ќе се изврши анализа на квалитетот на гасот во случај да е потребна негова преработка на лице место на пазарот постојат соодветни сетови на инструменти познати како сервисни единици кои се преносливи и се сместени на колици (Слика 10). При тоа се користат компресори кои овозможуваат земање на гасот и доведување до притисок еднаков на притисокот на гасот во комората. Исто така во сервисните единици има и вакум пумпа која овозможува вакумирање на прекинувачот пред неговото повторно полнење со SF_6 гас. Гасот кој е изваден од опремата се пропушта низ суви филтри и филтри за одстранување на поголеми парчиња нечистотија. Сувите филтри овозможуваат апсорбирање на продуктите на декомпозиција на гасот и влагата. Филтрите за одстранување на цврстите парчиња во гасот слугат за одстранување на продуктите од декомпозицијата на гасот. Посебно внимание треба да се посвети на системите кои служат за поврзување со SF_6 гасот со цел да се намалат несаканите загуби и течења на гасот. Ако вака прочистениот гас ги исполнува барањата на операторот на постројката и стандардот IEC 60480 за користени гасови истиот може да се врати назад во опремата со помош на сервисната единица. Ако загадувањето на гасот е над дозволеното ниво, гасот се уништува во специјални за тоа предвидени депонии. На слика 11 е претставен основниот концепт на прочистување на гасот со помош на сервисните единици.



Слика 10 Подвижни сервисни единици од производителот DILO



Слика 11 Блок дијаграм на пречистување на гасот со сервисни единици

Во некои случаи производителите на гас имаат можност да го пратат гасот во депониите за негово уништување и една од нив е Solvay Fluor GmbH. Ако анализите покажат загаден гас над дозволените граници, истиот се втечнува на притисок од 50 бари, се става назад во специјални боци за транспорт на користен гас (Слика 12) и се враќа назад кај производителот кој го рециклира гасот со цел добивање на нов SF₆ гас.

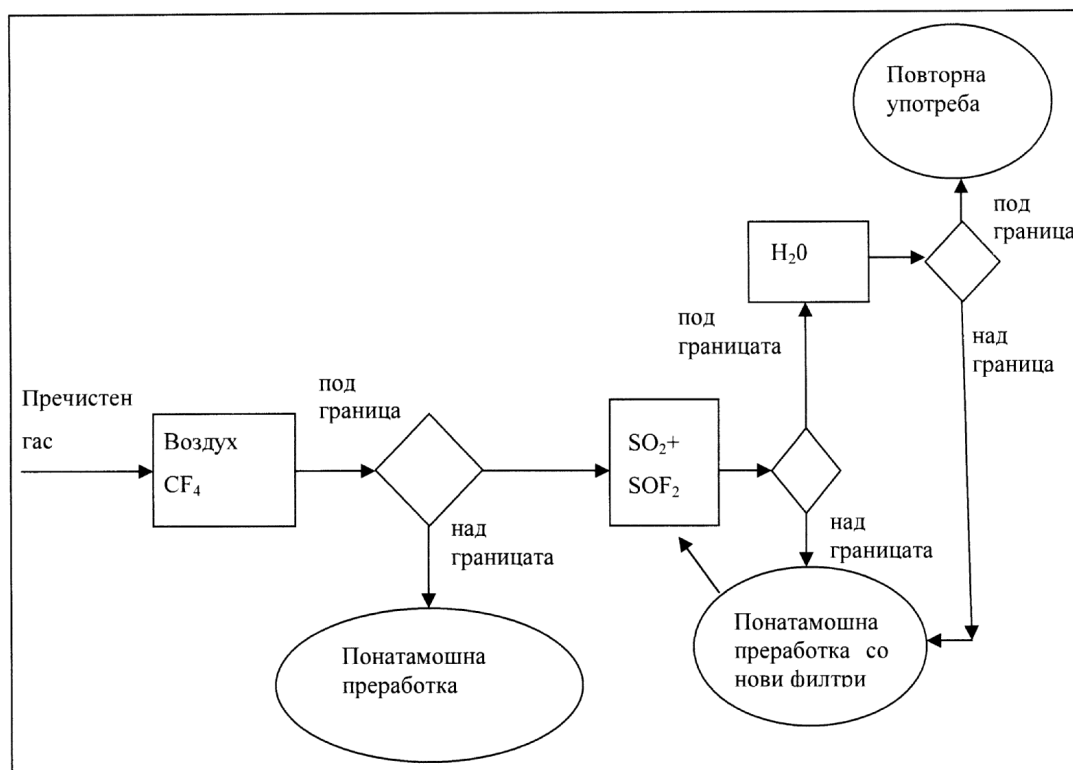


Слика 12 Solvay Fluor 491 и 6001 SF₆ пакување за повторно користење на гас

Доколку гасот се регенерира и користи назад во опремата, таквиот гас мора да ги задоволува критериумите за повторно користен гас, кој после рециклирањето како нов гас се враќа во опремата. Спецификацијата на дозволените параметри за гас кој може се прочисти и повторно да се користи се дадени во Табела 1 а блок дијаграмот кој ја дефинира проверката на квалитетот на гасот е даден на Слика 13.

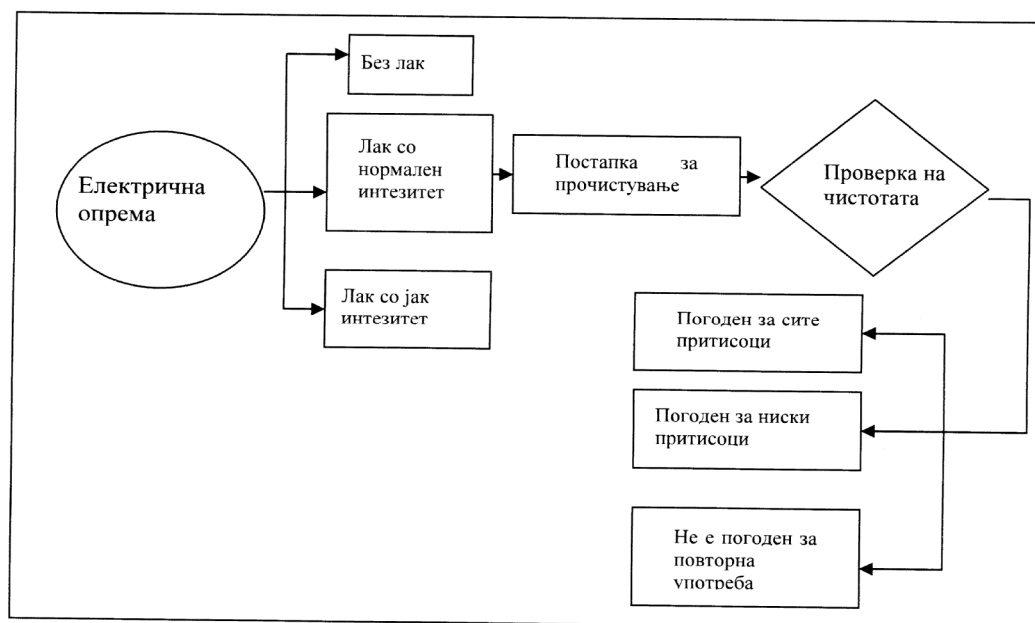
Табела 1 Критериуми за повторно користење на SF₆ гас

Загадување	Спецификација за повторно користен SF ₆ гас
Воздух (N ₂ , O ₂)	< 30 % од волуменот
CF ₄	< 5 % од волуменот
H ₂ O	<1000ppm по тежина
HF	< 1000ppm по тежина
Масло	< 0.1 % по тежина
Придружни супстанции	< 5 % по тежина


Слика 13 Проверка на квалитетот на гасот

Гасот кој се вади од опремата со цел да се прочистува или комплетно рециклира и после пеработката се вака повторно во опремата треба да припаѓа на категоријата на гас кој може да биде вратен назад во опремата. Категоријата на гас зависи од тежината на неговата загаденост и според тоа гасот се дели на три категории: гас во кој немало горење на лак, гас во кој горел лак со нормален интезитет и гас со лак со поголем интезитет (Слика 14). Врз основа на категоријата на гас се одбира постапката за прочистување. Откако гасот ќе ја помине постапката за прочистување истиот се подложува на проверка на квалитетот и во зависност од тоа се дели на три категории:

- Гас кој е погоден за повторно користење и може да се користи во комплетниот опсег на притисоци. Овој гас може да се користи во електричната опрема без било какви ограничувања.
- Пониска категорија на гас кој може да се користи за понизок опсег на притисок . Овој гас може да се врати во опремата со притисок на полнење до 200 kPa.
- Категорија на гас кој не е погоден за повторно користење . На овој гас му е потребна понатамошна обработка најчесто надвор од местото на употреба.



Слика 14 Категоризација на гасот после прочистувањето

4. ЗАКЛУЧОК

SF₆ гасот е безбоен гас, без мирис и е хемиски неутрален (инертен) гас. Иако еколошки нема токсичен потенцијал и не ја уништува озонската обвивка, сепак е означен како гас кој допринесува кон создавањето на ефектот на стаклена градина. Неговите изолациони својства се три пати подобри од изолационите својства на воздухот и има исклучителна способност за гаснење на електричниот лак и добра топлинска дисипација. Тоа го прави идеален гас за користење во високонапонската расклопна опрема и високо и средно напонските гасно изолирани трафостаници. Во текот на изминативе години направени се бројни истражувања со цел да се најде адекватна замена на SF₆. Сепак се уште не може да се најде соодветен гас или соединение кое би ја заменило употребата на SF₆ гасот во високонапонската расклопна опрема како и во оклопените трафостаници. Затоа од аспект на заштитата на животната средина неопходно е да се превземат мерки со што ќе се намали неговата емисија. Таквите мерки се претставени во овој труд почнувајќи од процесот на производство на опремата, детекција истекувањето на гасот во тек на животниот век на опремата до примена на концептот на повторно користење на гасот.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Kynast .”Investigations concerning discussed alternatives to SF6 in HV equipment for insulating and arc-extinguishing properties”, CIGRE SC A3, Joint Colloquium Tokyo, 2005.
- [2] J.l. Bessede, A.Buescher, R. Marshall, G.F. Montillet, A. Stelter “Limiting SF6 Gas emission by optimization of Design and Handling over the Life cycle of HV Switchgear”, EPA, San Antonio, 2006.
- [3] R. Madding, R. Benson “ Sulfur Hexafluoride Insulating Gas Leak Detection with IR Camera”, InfraMation, 2007.